

# VORTEX PADA BANGUNAN PENGAMBILAN (INTAKE) WADUK WONOGIRI

Siti Qomariyah

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS, Jln Ir. Sutami 42 – Surakarta. Tlp/fax : 0271 643524

Email : [addin@uns.ac.id](mailto:addin@uns.ac.id)

## Abstract

*Vortex or swirling flow in a reservoir is a result of the complex interaction among the geometry of the reservoir, the approach channel, the flow velocity, and the liquid properties. The vortex enables air entrains and floating trash took in the flow system swirling to an inlet of an intake. This natural phenomenon may result in a disturbance of an intake performance. An aim of the experiment was to examine the occurrence of vortex in front of an intake structure of a reservoir and the provision of a floating raft for its elimination. It used a physical model by taking the intake of Wonogiri reservoir as a model. Results proved that vortex definitely occurred, experimentally and approached analytically, in front of the intake and was able to be eliminated significantly by applying a floating raft as a vortex suppression device.*

## Keywords:

*floating raft, swirling flow, vortex*

## PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dipandang sebagai sumber daya yang dapat diperbaharui, bersih, dan tidak menimbulkan polusi dalam memproduksi tenaga listrik dibanding pembangkit listrik lain. Mengingat PLTA beserta komponen utama yaitu waduk, bangunan pengambilan (*intake*), pipa tekan, dan infrastruktur pelengkap lainnya bertujuan untuk memenuhi kepentingan masyarakat banyak, maka keamanan operasi bangunan tersebut perlu diperhatikan. Menurut Kobus (1991), keamanan operasi suatu bangunan hidraulik tidak hanya mempertimbangkan sifat-sifat aliran semata, melainkan memperhatikan pula pengaruh masuknya udara ke dalam sistem aliran air.

Masuknya udara bersama-sama aliran air yang berputar-putar (*swirling flow*) yang membentuk formasi *vortex* menuju *intake* merupakan kejadian alam pada kondisi transisi, yaitu dari permukaan bebas menuju aliran yang bertekanan di dalam saluran tertutup. Udara dan aliran yang masuk *intake* dapat menyebabkan aliran dalam pipa pesat di hilir *intake* berfluktuasi sehingga kinerja turbin tidak optimal.

*Swirling flow* yang terjadi di waduk-waduk yang banyak terdapat material apung atau sampah akan memperparah kinerja *intake*. Material apung banyak dijumpai di permukaan waduk-waduk di Indonesia. Waduk Wonogiri misalnya, material apung berasal dari sisa-sisa hasil pertanian atau kegiatan masyarakat di lahan pertanian kering hulu waduk. Pada musim penghujan, material tersebut terbawa oleh aliran air bersama-sama

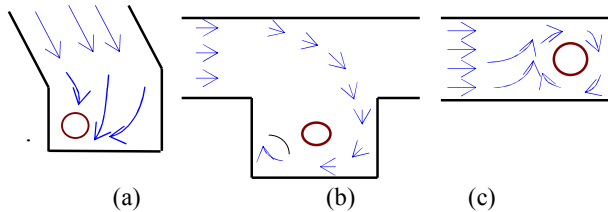
dengan erosi permukaan masuk ke dalam waduk menuju *intake*. Selanjutnya, tumpukan sampah bercampur dengan material endapan sedimen menyumbat jalan air dan lubang *intake*. Akibatnya, kinerja *intake*, turbin, dan pembangkit listrik tenaga air terganggu (JICA, 2006).

Tulisan ini menyajikan hasil pengamatan di laboratorium menggunakan model fisik terhadap terjadinya *vortex* dan upaya mengeliminasinya dengan model penahan pusaran. Bangunan *intake* waduk Wonogiri digunakan sebagai model dalam kajian ini.

Kondisi aliran yang menyebabkan terjadinya *air entrainment* oleh Kobus (1991) diuraikan terjadi pada: a) sepanjang permukaan aliran dengan kecepatan yang tinggi, misalnya pada bangunan pelimpah; b) permukaan aliran yang terputus akibat terjunan, yaitu pada bangunan ambang tajam, bangunan terjunan, atau kolam pemecah energi; c) aliran transisi dari permukaan bebas ke saluran tertutup / bertekanan, misalnya pada bangunan pengambilan/*intake* di waduk.

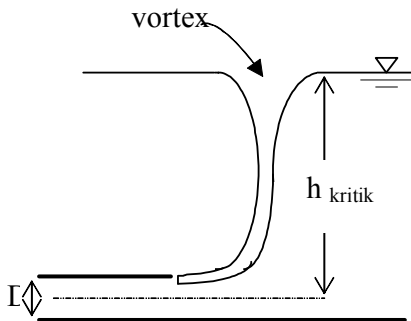
Knauss (1987) menguraikan bahwa aliran yang berputar-putar di depan *intake* suatu waduk disebabkan oleh beberapa faktor, terutama oleh kondisi geometri wilayah setempat yang mengarahkan aliran menuju *intake* (*approach flow*). Meskipun distribusi kecepatan pada *approach flow* dalam kondisi ideal, proses / sifat hidraulik dapat pula menimbulkan pusaran karena adanya kecepatan membesar dan kemiringan saluran. Gambar 1 menunjukkan *boundary* / geometri waduk dan lokasi *intake* yang memudahkan ter-

jadinya aliran yang berputar-putar / *vortex*. Hal tersebut antara lain akibat lokasi bangunan *intake* yang a-simetris terhadap datangnya aliran yang menuju bangunan *intake* atau alinyemen batas wilayah yang tidak beraturan atau berbelok-belok (1a); kondisi yang tidak ideal antara datangnya aliran menuju *intake* mendorong terbentuknya aliran yang berputar-putar (1b); atau karena *velocity gradient* aliran yang menuju *intake* (1c).



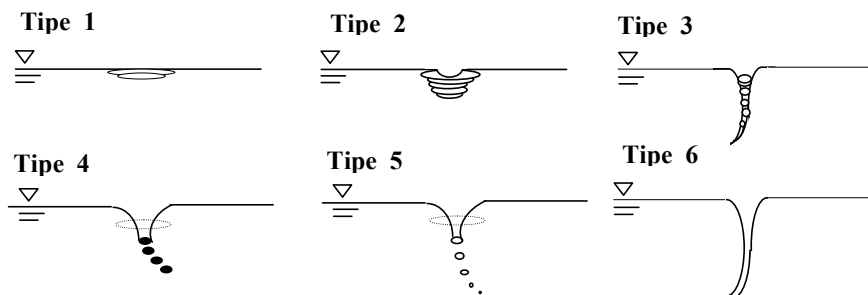
Gambar 1. Pengaruh geometri dan lokasi *intake* terhadap pembentukan *vortex* (Knauss, 1987)

Knauss (1987) menjelaskan bahwa: a) udara yang terserap ke dalam pusaran air dan masuk ke bangunan pengambilan sangat tergantung pada kedalaman atau tinggi air di atas bangunan pengambilan; b) kedalaman kritis suatu bangunan pengambilan adalah kedalaman pada saat ujung *vortex* berada di depan inlet (Gambar 2).



Gambar 2. Ujung *vortex* di depan inlet

Masuknya udara bebas ke dalam intake dapat dihindari dengan menjaga aliran dalam kondisi



Gambar 3. Tipe *vortex* (Hecker, 1987)

*submerged*. Aliran *Submerge* merupakan fungsi dari parameter seperti ditunjukkan dengan persamaan:

$$(h/D)_{\text{kritik}} = f(\phi, c/\sqrt{g} \cdot D^{3/2}) \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

- h = kedalaman *intake*,
- D = diameter *intake*,
- $\Phi$  = arah *intake*,
- c = *circulation constant*,
- g = percepatan gravitasi.

Faktor a-simetri geometri waduk di area *intake* merupakan faktor paling penting dalam pembentukan pusaran air namun sulit ditirukan secara analitis. Untuk itu, percobaan dengan menggunakan model fisik diperlukan (Hecker, 1987). Penelitian di *Alden Research Laboratory* mengklasifikasikan *vortex* dalam beberapa tipe seperti terlihat dalam Gambar 3. Tipe *vortex* (TP) tersebut merupakan fungsi dari parameter geometri:

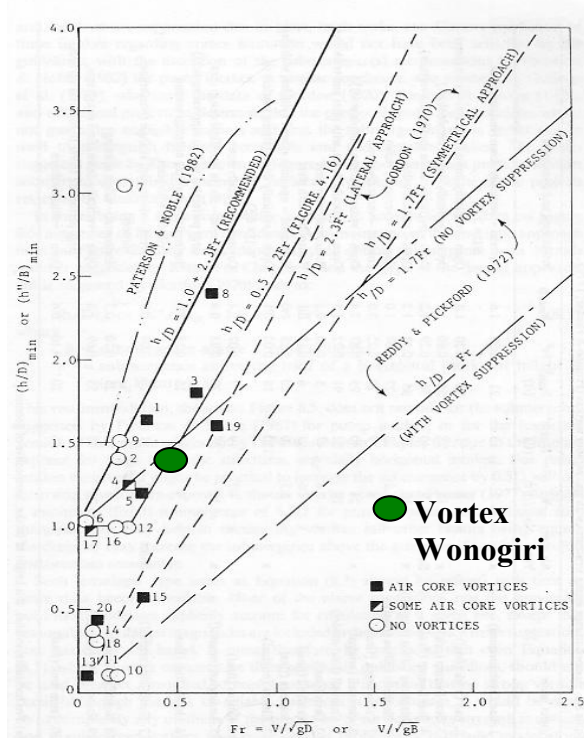
$$TP = f(Fh, N_f, h/D) \dots\dots\dots [2]$$

Keterangan:

- Fh = angka *submergence* Froude,
- $N_f$  = *circulation number*,
- h = kedalaman *intake*,
- D = diameter *intake*.

Tipe *vortex* 1 merupakan awal aliran air berputar di permukaan. Tipe 2, putaran air mulai menunjukkan adanya cekungan kedalam di bagian tengah pusaran. Tipe 3 pusaran air mulai membentuk kolom udara (*vortex*) yang bergerak menuju inlet. Tipe 4 kekuatan *vortex* mampu menarik material apung masuk ke dalam pusaran. Tipe 5 adalah *vortex* dimana gelembung-gelembung udara pecah di ujung pusat pusaran yang masuk bangunan *intake*. Tipe 6 *vortex* dengan lubang udara penuh menuju *intake*.

Hubungan antara  $(h/D)$  dan  $Fr$  dari beberapa percobaan disajikan dalam Gambar 4. Rekomendasi perlu tidaknya perlindungan terhadap *vortex* dilakukan dengan menghitung: a)  $(h/D)$ ; dimana  $h$  adalah kedalaman air dari permukaan waduk minimum ke tengah lubang inlet; dan  $D$  adalah diameter inlet. b) angka Froude ( $Fr$ ) =  $V / \sqrt{gD}$ ; dimana  $V$  adalah kecepatan aliran;  $g$  percepatan gravitasi; dan  $D$  diameter *inlet*. Dalam Gambar 4 terlihat bahwa kedalaman minimum  $h/D$  direkomendasi pada  $h/D$  sama dengan: 1+2,3  $Fr$ .



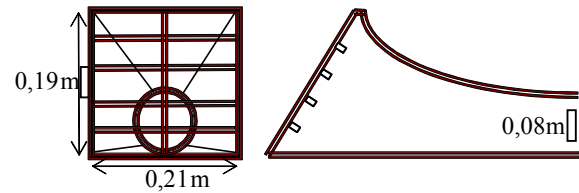
Gambar 4. Hubungan antara  $h/D$  minimum dan  $Fr$

Bangunan anti *vortex* yang dimaksudkan untuk mengeliminasi atau menahan *vortex* telah diaplikasikan di depan bangunan *intake* pada waduk-waduk di beberapa negara. Namun demikian, belum ada *guideline* tentang bangunan anti *vortex* yang dapat digunakan mengingat geometri waduk, yang merupakan variable yang menentukan, berbeda antara satu waduk dan waduk lainnya (Rutschmann et.al, 1987).

## METODE PENELITIAN

Kajian ini dilakukan di laboratorium hidraulika Jurusan Teknik Sipil FT UNS dengan menggunakan model fisik. Model fisik bangunan pengambilan waduk Wonogiri dibuat dari *fiberglass* dengan *undistorted model* dengan skala 1:70. Tampak depan dan samping dari inlet disajikan dalam Gambar 5. Untuk area depan

*intake*, model dibuat dengan pasangan bata, pasir dan semen dengan bentuk yang disederhanakan yaitu berbentuk segi 4 seperti terlihat dalam Gambar 6. Dalam gambar tersebut, model geometri saluran pengarah (*approach channel*) dibuat dengan menirukan elevasi saluran pengarah didepan *intake* waduk Wonogiri.



Gambar 5 Intake tampak depan dan samping

Dinding model dibuat dari kaca dengan garis-garis ketinggian, sehingga proses terjadinya *vortex* dapat diamati dari samping dengan jelas. Saluran penyalur air dibuat dari pipa PVC untuk mengalirkan air setelah melewati inlet. Alat ukur yang digunakan meliputi jangka sorong untuk mengukur diameter pusaran, stop watch untuk mengukur lama pengaliran, point gauge untuk mengukur tinggi muka air, dan alat pelengkap lain. Potongan material gabus digunakan untuk menirukan material apung (sampah) di permukaan waduk. Penggunaan zat warna yang disiram di permukaan air dilakukan untuk pengamatan pola aliran / pusaran yang terjadi. Model bangunan penahan pusaran tipe terapung dibuat dari bahan triplek.

Macam pengamatan meliputi proses terjadinya *vortex*; pengamatan terhadap pola aliran; dan pengaruh bangunan penahan pusaran terhadap *vortex*. Untuk pengamatan pengaliran, model menirukan kondisi waduk pada elevasi muka air waduk pada kondisi muka air (normal) tinggi yang mencapai elevasi + 136.00 m pada prototipe. Aliran yang melewati inlet bangunan pengambilan dilakukan dengan menirukan debit rencana yang mengalir melewati *intake* waduk Wonogiri sebesar 75 m<sup>3</sup>/dt.

Untuk menjamin kontinuitas pengaliran atau muka air, pengaliran dibuat dengan sirkulasi tertutup atau menerus dengan bantuan bangunan pelengkap model yang terdiri dari pompa air, bak penampung, instalasi pipa, dan katup pengatur. Dengan skala model tanpa distorsi sebesar 1:70, besaran prototipe dan model dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Besaran Prototipe, Skala, dan Model

Variabel	Prototipe	Skala	Model
Panjang inlet (m)	14,70	70	0,21
Tinggi inlet (m)	13,30	70	0,19
Diameter inlet (m)	5,5	70	0,08
Panjang pipa penyalur (m)	66,5	70	0,95
Diameter pipa penyalur (m)	3,5	70	0,05
Debit intake m <sup>3</sup> /dt	75	40.996	0,00183
Lebar geometri depan intake (m)	77	70	1,1
Panjang geometri depan intake (m)	224	70	3,2
Kedalaman air depan intake (m)	23	70	0,33

## HASIL DAN PEMBAHASAN

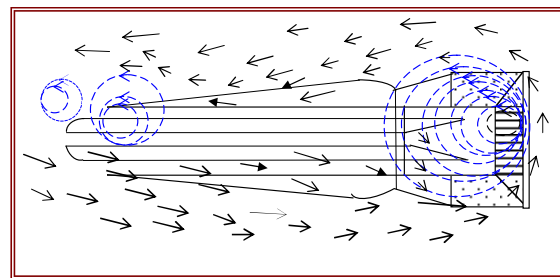
Dari data teknis waduk Wonogiri (Nippon Koei, 1977) diperoleh besaran: a) muka air terendah adalah pada El. +127.00m, maka kedalaman air (h) minimum waduk dari permukaan waduk terendah ke tengah lubang inlet adalah sebesar 8,25 m; b) kecepatan aliran yang melewati inlet 2,803 m/dt; diameter (D) inlet 5,5 m; dan angka Froude adalah 0,382. Hubungan antara (h/D) minimum, yaitu sama dengan 1,5 dan angka Froude jika di plotkan ke dalam grafik seperti terlihat dalam Gambar 4 terletak pada wilayah yang menunjukkan adanya *vortex*. Disamping itu, h/D intake Wonogiri (=1,5) masih dibawah besaran h/D yang direkomendasikan, yaitu 1+2,3 Fr (=1,879). Dengan demikian, dengan pendekatan tersebut *vortex* diindikasikan terjadi di depan bangunan intake waduk Wonogiri.

Grafik Reddy & Pickford yang tercantum dalam Gambar 4 menunjukkan bahwa jika h/D sama dengan 1,75Fr, bangunan penahan *vortex* tidak diperlukan. Pada intake waduk Wonogiri, h/D menunjukkan besaran yang lebih besar yaitu 3,93Fr, dengan demikian bangunan penahan *vortex* diperlukan di waduk Wonogiri untuk menahan *vortex* yang terjadi.

Secara umum pengaliran menunjukkan bahwa sebelum aliran mengalami kondisi transisi, yaitu dari permukaan bebas ke saluran tertutup, pada permukaan air terdapat area / volume air yang bersifat diam. Kondisi geometri depan intake dan batas (*boundary*) tampungan air yang menuju intake mendorong volume air yang diam tersebut membentuk aliran air yang berputar-putar dengan permukaan air membentuk cekungan; hal ini memberikan peluang masuknya udara ke dalam sistim aliran.

Pengamatan terhadap proses terjadinya *vortex* (tipe *vortex*) menunjukkan bahwa tipe *vortex* yang terjadi sesuai dengan tipe *vortex* yang dihasilkan oleh Alden Research Laboratory, yaitu Tipe 1 sampai dengan Tipe 4 (Gambar 3). Dengan bantuan zat warna, aliran yang berputar-putar di permukaan membentuk cekungan dan masuk kedalam bangunan pengambilan nampak jelas. Pengamatan dari atas menunjukkan bahwa pola aliran yang terjadi hampir sama untuk variasi ketinggian muka air, yaitu terdapat aliran yang berputar di ujung saluran pengarah dimana kemiringan dasar saluran pengarah mulai menurun. Hal ini sesuai dengan yang terjadi pada Gambar 1c. Pusaran air di depan intake mampu menyedot material apung kedalam pusaran menuju lubang inlet. Fenomena ini sesuai dengan kondisi di prototype / waduk Wonogiri bahwa material apung yang berupa sampah produk pertanian banyak terdapat di kisi-kisi (*trashrack*) depan inlet sehingga hampir menutup jalannya air. Tipe 5 dan Tipe 6 tidak terjadi dalam percobaan ini. Hal ini sesuai pula dengan kondisi di prototype bahwa udara bebas yang membentuk kolom dalam *vortex* masuk ke dalam intake tidak terjadi di intake waduk Wonogiri.

Hasil pengamatan dengan variasi permukaan air (kedalaman air) menunjukkan bahwa pusaran air lebih sering terjadi di sisi sebelah kanan lubang intake (Gambar 6). Diameter pusaran air di model bervariasi antara 1,9cm – 2,4cm. Dengan skala model 1:70, diameter pusaran air di prototype menjadi antara 133cm – 168cm. Pusaran di sebelah kiri akan terjadi pada saat muka air rendah dengan diameter pusaran berkisar 2,0cm di model atau 140cm di prototype.



Gambar 6. Tampak atas pusaran air

Penyederhanaan model sudah dapat menunjukkan adanya *vortex*. Dengan demikian, mengacu pada Knaus Gambar 1, yang menunjukkan kondisi dalam boundary wilayah waduk dapat memicu terjadinya *vortex*, maka dapat dipastikan bahwa *vortex* terjadi pada prototype intake waduk

Wonogiri memiliki *boundary* yang tidak homogen.

Arwani (2003) melakukan pengamatan dengan model *intake* yang sama dengan memanfaatkan tinggi optimal model kolam. Pengaliran dilakukan dengan 2 seri. Seri I dengan menirukan kondisi adanya aliran masuk ke waduk (musim hujan). Seri II dengan menirukan kondisi tidak adanya aliran masuk ke waduk (musim kering). Hasil pengaliran menunjukkan hubungan antara kedalaman air dan diameter pusaran seperti disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Hubungan antara kedalaman air (H) dan diameter pusaran (D)

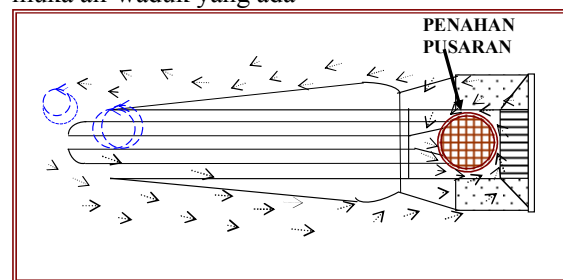
Seri I		Seri II	
H (m)	D (mm)	H(m)	D(mm)
0,532	47,37	0,289	18,60
0,517	44,18	0,275	19,11
0,503	43,43	0,260	21,16
0,489	41,26	0,246	21,60
0,475	41,95	0,232	21,30
0,460	37,54	0,217	21,43
0,446	32,20	0,203	22,16
0,432	37,44	0,189	22,56
0,417	39,01	0,175	23,48
0,403	36,98	0,160	22,08
0,389	36,10	0,146	20,43
0,375	33,96		
0,360	29,89		
0,346	29,83		
0,332	22,11		

Hasil pengamatan tersebut di atas menunjukkan bahwa untuk Seri I, semakin turun muka air atau kedalaman air maka semakin kecil diameter pusaran. Sebaliknya, untuk Seri II, semakin turun muka air semakin membesar diameter pusaran air (kecuali 2 kondisi terendah yang dapat diasumsi akibat pengaruh gaya gesek yang lebih besar). Dengan demikian, pada musim kemarau, yaitu tidak ada aliran permukaan yang masuk waduk, maka pusaran air justru terjadi pada saat muka air lebih rendah dengan diameter pusaran yang membesar.

Dengan model yang sama, Yuniati (2003) mengamati hubungan antara kedalaman air dengan kecepatan aliran yang melewati *intake*. Kecepatan aliran diukur dengan current meter. Hasil yang diperoleh adalah semakin tinggi kedalaman air semakin besar kecepatan aliran. Dengan hitungan numerik, bilangan Froude diperoleh lebih besar dari 1 untuk semua variasi

kedalaman air. Hal ini sesuai dengan kondisi pengaliran di model yang menunjukkan bahwa aliran yang terjadi adalah super kritik atau menjeram. Untuk kondisi di prototipe, daya yang dihasilkan dari aliran ini digunakan untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik tenaga air.

Percobaan dilakukan dengan menempatkan model bangunan penahan pusaran jenis terapung (*floating raft*) yang diletakkan di lokasi *vortex* untuk mengeliminasi terjadinya pusaran. Dari beberapa percobaan, model *floating raft* dengan diameter 5cm (di prototipe 3,5m) adalah yang paling optimal dapat mengeliminasi kekuatan *vortex*. Kekuatan pusaran dapat dipatahkan dengan adanya penahan terapung ini. Hal ini diketahui dari tidak adanya arus utama pusaran air yang masuk menuju inlet. Aliran di sekeliling penahan terapung melemah dengan membawa material apung yang akhirnya tersangkut ditepi bangunan penahan (Gambar 7). Terlepas dari *life time* nya, kelebihan penahan pusaran jenis terapung adalah dapat menyesuaikan dengan muka air waduk yang ada



Gambar 7. Penahan pusaran tipe terapung (*floating raft*) di atas *vortex*

## SIMPULAN

Pengaruh *vortex* dapat diminimalkan jika dalam perencanaan waduk memperhatikan kedalaman minimal *intake* dari permukaan waduk, geometri *intake* dan saluran pengarah. Jika hal-hal tersebut tidak dapat dioptimalkan, bangunan penahan pusaran diperlukan.

Pengamatan model fisik dan pendekatan analitik menunjukkan bahwa *vortex* terjadi di depan bangunan *intake* waduk Wonogiri. Meskipun *vortex* yang terjadi tidak sampai memasukkan udara bebas langsung ke dalam *intake*, namun *vortex* mampu menyerap material apung dari permukaan waduk masuk ke dalam sistim aliran menuju bangunan *intake*.

Bangunan penahan pusaran tipe terapung (*floating raft*) dapat mengurangi kekuatan *vortex* serta

menahan material apung (sampah) untuk tidak bergerak menuju *intake*.

Mengingat masing-masing waduk memiliki kondisi geometri yang berbeda-beda, *guideline* penggunaan bangunan penahan pusaran akan sulit diwujudkan. Untuk itu, penelitian dengan modek fisik hidraulik diperlukan untuk menentukan tipe dan dimensi bangunan penahan pusaran yang paling tepat bagi waduk yang bersangkutan.

Akurasi kajian model fisik perlu dilakukan dengan skala yang lebih kecil dengan model tiga dimensi.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Profesor Franz Nestmann, Mr. Werver Helm, Bp. Ir. Solihin, MEng. dari Universitas Karlsruhe – Jerman atas bantuannya dalam penyediaan model *intake* Wonogiri.

### REFERENSI

- Arwani, M. 2003, “Fenomena Pusaran Air di Muka *Intake* akibat Perubahan Aliran dari Saluran Terbuka ke Saluran Tertutup”, Skripsi S1 Jurusan Teknik Sipil, FTUNS.
- Hecker, G.E. 1987, “Fundamental of Vortex Intake Flow”,. Dalam J.Knauss (co. edit). “Swirling Flow problems at Intake”, Inter-

national Association for Hydraulic Research (IAHR). AA Balkema. Rotterdam.

- JICA. 2006, “Studi Penanggulangan Sedimentasi Waduk Serbaguna Wonogiri”, Departemen Pekerjaan Umum.

Kobus, H. 1991, “Introduction to Air Water Flow”, Dalam I.A.Wood (co.edit). “Air Entrainment in Free Surface Flow”, International Association for Hydraulic Research (IAHR). AA Balkema. Rotterdam.

Knauss, J., 1987, “Predictuion of Critical Submargence”, Dalam J.Knauss (co. edit). “Swirling Flow problems at Intake”, International Association for Hydraulic Research (IAHR). AA Balkema. Rotterdam.

Nippon Koei, Co. Ltd. 1977, “Detail Design Bendungan Serbaguna Wonogiri”, Departemen Pekerjaan Umum.

Rutschmann, P., Volkert, P., dan Vischer, D. 1987, “Design Recommendation”, Dalam J.Knauss (co. edit). “Swirling Flow problems at Intake”, International Association for Hydraulic Research (IAHR). AA Balkema. Rotterdam.

Yuniati. 2003, “Hubungan Antara Kedalaman Air dengan Bilangan Froude pada Model Intake”, Skripsi S1 Jurusan Teknik Sipil, FTUNS.